

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гапончика Романа Валерьевича на тему «Исследование наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн и магنونных вычислительных устройств на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

На сегодняшний день благодаря успехам в технологии эпитаксиального роста пленочных монокристаллических магнитных материалов и новым подходам к формированию периодических магнитных структур, период которых сравним с длиной спиновой волны, большой интерес вызывают исследования, связанные с изучением линейного и нелинейного распространения спиновых волн в таких структурах. Указанные периодические магнитные структуры получили название – *магنونные кристаллы*, по аналогии с фотонными кристаллами в оптике. Одним из преимуществ магنونных кристаллов по сравнению с фотонными кристаллами является возможность управления свойствами спиновых волн (дисперсией, фазовой и групповой скоростями) как с помощью внешнего постоянного магнитного поля, так и различных импедансных нагрузок. Помимо этого, магنونные кристаллы могут быть интегрированы в планарные устройства обработки сигналов СВЧ диапазона, что представляет несомненный практический интерес.

Известно, что в ферромагнитных пленках существует большой спектр нелинейных явлений, которые обусловлены как параметрическим взаимодействием спиновых волн, так и модуляционной неустойчивостью ферромагнитной среды, приводящей, в частности, к формированию уединенных спиновых волн – солитонов огибающей. В отличие от оптических сред перечисленные нелинейные эффекты наблюдаются в тонкопленочных ферромагнитных структурах при гораздо меньших уровнях мощности, что делает магнитные материалы перспективной средой для изучения нелинейных волновых явлений. На сегодняшний день нелинейные эффекты в магنونных кристаллах изучались применительно к формированию консервативных щелевых солитонов огибающей, диссипативных солитонов огибающей и к прохождению двухчастотных сигналов в условиях трехволнового параметрического взаимодействия. Были получены экспериментальные результаты, указывающие на возможность создания на основе магنونных кристаллов нелинейных СВЧ устройств: усилителей отношения сигнал/шум, ограничителей мощности и нелинейных фазовращателей. Однако, теоретического описания особенностей нелинейного взаимодействия двух спиновых волн (прямой и отраженной или большой и малой амплитуды), приводящего к изменению фазового набега одной из волн до сих пор получено не было.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование нелинейного фазового сдвига маломощной спиновой волны, наведенного мощной спиновой волной накачки, а также спин-волновых логических устройств на основе данного нелинейного эффекта **является актуальной фундаментальной задачей**, а использование ферромагнитных пленок и магنونных кристаллов на их основе для создания аппаратной реализации резервуарных вычислений имеет **важную прикладную направленность**.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации и списка литературы, включающего 105 наименований. Полный объем диссертационной работы составляет 111 страниц текста с 47 рисунками и 4 таблицами. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели работы и изложены основные положения, выносимые на защиту. В работе представлен обзор имеющихся теоретических и экспериментальных результатов по вопросам, рассматриваемым в диссертации. Автором получен ряд важных и интересных результатов, представляющих несомненный интерес для специалистов в области радиофизики и спин-волновой электроники. Среди наиболее значимых новых результатов, полученных диссертантом, можно выделить следующие:

1. Теоретически и экспериментально исследован наведенный нелинейный сдвиг фазы спиновых волн различных типов, распространяющихся в магنونных кристаллах. Показано влияние нелинейного затухания волны накачки, а также влияние отражения волны накачки от периодической структуры на наведенный нелинейный фазовый набег спиновых волн.

2. Проведено исследование спин-волнового логического элемента, в основе работы которого лежит эффект наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн, а также явления интерференции спиновых волн.

3. Разработана модель магنونной резервуарной вычислительной системы с токовым механизмом ввода данных. Исследовано влияние параметров конструкции магنونного физического резервуара на его характеристики.

4. Экспериментально исследованы рабочие характеристики и производительность магنونного физического резервуара с токовым механизмом ввода данных. Показана возможность выполнения трех базовых операций – нелинейного отображения, кратковременной памяти и ввода данных – одним и тем же компонентом – пленкой железо-иттриевого граната.

В целом **научная новизна** работы заключается в экспериментальном и теоретическом исследовании наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн в магнетонных кристаллах, а также нелинейных элементов магнетонной логики на базе данного нелинейного эффекта. С практической точки зрения ценность диссертационной работы заключается в изучении схемы магнетонного резервуара с токовым типом ввода данных, построенной на базе активного спин-волнового кольцевого резонатора.

Сформулированные научные положения и выводы к работе хорошо обоснованы и полностью опираются на результаты, полученные в диссертационной работе и отраженные в публикациях автора по теме диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректностью постановки задачи, не противоречащей известным теоретическим представлениям, а также хорошим согласованием полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что разработанные теоретические модели позволяют выявить не только физические механизмы, приводящие к нелинейному фазовому сдвигу у одной из двух связанных спиновых волн (прямой спиновой волны под действием отраженной спиновой волны в магнетонном кристалле или спиновой волны малой амплитуды под действием спиновой волны большой амплитуды в ферромагнитной пленке), но и помочь в создании логических и нейроморфных вычислительных устройств с использованием данного нелинейного эффекта.

Однако к диссертационной работе имеется ряд **замечаний**:

1. Во второй главе речь идет об эффекте нелинейного фазового сдвига спиновой волны малой амплитуды под действием спиновой волны большой амплитуды (волны накачки) в магнетонных кристаллах. Данный эффект, исходя из текста диссертационной работы, связан с наличием у волны накачки нелинейных потерь, возникающих в результате нелинейных четырехволновых спин-волновых взаимодействий. Однако, как известно, в ферромагнитных пленках нелинейные потери могут быть обусловлены и трехволновым параметрическим распадом дипольной спиновой волны на дипольно-обменные спиновые волны. Экспериментальное исследование нелинейного фазового сдвига у спиновой волны малой амплитуды под действием спиновой волны большой амплитуды в условиях трехволнового параметрического распада было проведено в работе

[Гришин С.В., Нудельман Я.Е., Шараевский Ю.П. Влияния большого сигнала на характеристики малого сигнала в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах // ЖТФ. 2007. Т. 77, № 6. С. 129-131] с помощью отечественного измерителя амплитуд и разности фаз ФК2-33, позволяющего корректно измерять амплитудные и фазовые характеристики малого сигнала, находящегося в непосредственной близости от частоты большого сигнала. В случае трехволновых процессов нелинейный фазовый сдвиг наблюдался только при отстройках меньше 30 МГц. Попытка моделирования данного нелинейного эффекта была предпринята в кандидатской диссертации оппонента (2006 г.). На основе проведенных расчетов была разработана мостовая схема с нелинейным фазовращателем на спиновых волнах для подавления малых сигналов вблизи частоты большого сигнала и получен патент на изобретение № 2281587 (2006 г.). Однако, в тексте диссертационной работы нет упоминаний про исследования нелинейного фазового сдвига за счет трехволнового параметрического распада дипольной спиновой волны.

2. Во второй главе (п.2.3) обсуждается экспериментальная методика по изучению наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн в двухчастотном режиме. При этом для возбуждения маломощной спиновой волны используется монохроматический СВЧ сигнал, который перестраивается по частоте, а для возбуждения мощной спиновой волны на фиксированной частоте используется импульсный СВЧ-сигнал, в роли которого, по всей видимости, выступает периодическая последовательность радиоимпульсов. Разработанная диссертантом экспериментальная методика работает при отстройках между сигналами больше 30 МГц. Ширина спектра импульсно-модулированного СВЧ сигнала зависит от длительности импульсов и может значительно превышать минимальное значение частотной отстройки в 30 МГц. В тексте диссертации нигде не приведены значения параметров последовательности радиоимпульсов (длительность, частота повторений, скважность). Хотелось бы знать значения этих параметров.
3. Во второй главе (п.2.3) проводится оптимизация параметров модели под экспериментальные данные. Однако нигде не говорится о том, какие методы оптимизации использовались. Необходимо было указать используемые методы оптимизации параметров модели в тексте диссертации.
4. В работе имеется ряд опечаток и неточностей. Например, на стр.62 «где $P_{\text{пад}}$ - мощность, падающая на вход интерферометра **мощность**» или здесь же «...АЧХ различных магн**онные** логическ**ие** элементов».

В целом диссертация и автореферат написаны достаточно строгим научным языком,

постановка задач, пути их решения и сделанные в ходе выполнения работы выводы достаточно убедительны. По теме диссертации соискателем опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в базе WoS и Scopus, и 9 материалов, опубликованных в других изданиях и материалах конференций.

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления о проделанной работе, которая представляет собой законченное научное исследование, выполненное на современном экспериментальном, технологическом и теоретическом уровне и имеющее практическое значение.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа Гапончика Романа Валерьевича на тему «Исследование наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн и магнанных вычислительных устройств на их основе» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный

Исследовательский государственный университет

имени Н.Г. Чернышевского»,

тел. (8452) 210-725

e-mail: sergrsh@yandex.ru

адрес: 410012 г.Саратов, ул. Астраханская 83,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Подпись Гришина С.В. заверяю:

Ученый секретарь СГУ

/Гришин Сергей Валерьевич/

24.11.2023

